

## **TERREMOTOS TIPO PULSO Y EFECTOS DE DIRECTIVIDAD DE LA RUPTURA**

### **Carlos Daniel Frau**

Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica (CeReDeTeC), Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional.  
Rodríguez 273, Mendoza, Argentina  
[cdfrau@frm.utn.edu.ar](mailto:cdfrau@frm.utn.edu.ar)

### **Rodolfo Saragoni**

Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Chile  
[rsaragon@ing.uchile.cl](mailto:rsaragon@ing.uchile.cl)

### **RESUMEN**

El presente trabajo realiza una síntesis de los aspectos más relevantes del fenómeno sísmico conocido como *directividad de la ruptura* presente en registros cercanos a la fuente sismogénica (*near-fault*). Contempla una reseña histórica que data desde los primeros indicios del fenómeno, descubiertos mediante la presencia de ciertos pulsos largos en los acelerogramas, hasta los criterios propuestos por los distintos autores para su simulación. Se describe en detalle cómo se genera y cómo es el movimiento de suelo en las proximidades de la falla que origina el terremoto y se citan casos donde se observó el fenómeno. Por último se resumen las propuestas de diversos investigadores para construir pulsos de aceleración o velocidad artificiales que sean capaces producir sobre las estructuras los principales efectos de un registro real *near-fault* con directividad de la ruptura. El trabajo pretende poner de manifiesto la importancia del fenómeno *near-fault* en el diseño sísmico de estructuras que se emplazan en zonas tectónicamente activas.

### **ABSTRACT**

This paper provides a summary of the most important aspects of seismic phenomenon known as directivity of the rupture in near-fault. Provides an overview of the phenomenon, discovered by the presence of certain long pulses in the accelerograms and criteria proposed by different authors for simulation. It describes in detail how it is generated and how is the movement of soil in the vicinity of the fault that causes the earthquake. It shows some cases where the phenomenon was observed. Finally a summary of the proposals of various researchers to build acceleration or velocity pulses are able to produce artificial structures on the main effects of an actual near-fault. The work aims to highlight the importance of near-fault phenomena in seismic design of structures that are located in tectonically active areas.

## 1 RESEÑA HISTÓRICA

Los terremotos consisten generalmente en una vibración aleatoria del suelo, sin embargo, en algunos casos se los ha considerado asumiendo que son movimientos periódicos y armónicos. Un repaso a los acelerogramas registrados en el mundo desde 1950 muestra que el movimiento del suelo puede ser de carácter vibratorio como así también de carácter impulsivo. Como ejemplo, el registro obtenido en EEUU durante el terremoto de Port Hueneme del 18 de marzo de 1957, mostró ser esencialmente un simple pulso de energía (Housner and Hudson, 1958). Este terremoto, a pesar de tener reducida magnitud ( $M=4.7$ ) y bajo pico de aceleración ( $0.08\text{ g}$ ), causó importantes daños (Bertero et al. 1999). Terremotos compuestos básicamente por un simple pulso con moderada magnitud ( $5.4$  a  $6.2$ ) y profundidad menores a  $30\text{ km}$  ocurrieron en Marruecos, Agadir en 1960; Lybia en 1963; Macedonia, Skopje en 1963 y San Salvador en 1965 (Rosembueth and Prince, 1965). Un terremoto relativamente pequeño de  $M=5.6$  ocurrió en la falla de San Andreas en Parkfield el 27 de junio de 1966, un registro ubicado a  $60\text{ m}$  de la falla mostró que la fase fuerte fue muy corta (menor a  $1.5\text{ s}$ ) y consistente de cuatro pulsos sucesivos de aceleración, uno de forma triangular de gran amplitud ( $0.50\text{ g}$ ), pero de corta duración ( $\approx 0.3\text{ s}$ ). Los cuatro pulsos de aceleración devinieron en un pulso de desplazamiento de  $23\text{ cm}$  y  $1.3\text{ s}$  de duración. Afortunadamente, este terremoto causó relativamente poco daño debido a la muy corta duración tanto del pulso como de la fase intensa y seguramente por esta razón no recibió mucha atención en la comunidad ingenieril (Bertero et al., 1999).

En 1965 Veletsos et al. realizaron investigaciones sobre las características de la respuesta de modelos vibratorios de un grado de libertad ante excitaciones impulsivas y concluyeron que para el rango de periodos bajos a intermedios, la respuesta elástica está condicionada por los pulsos de aceleración y velocidad, mientras que para los periodos largos queda gobernada por el pulso de desplazamiento. Encontraron también que los parámetros que controlaban la respuesta de los modelos son el número, amplitud y duración de los pulsos. En 1969 el mismo Veletsos observó que existía una relación directa entre la respuesta de sistemas excitados por acelerogramas reales y la obtenida mediante pulsos simples artificiales.

Quizá el primer terremoto destructivo en los EEUU con registros conteniendo pulsos de aceleración con capacidad de producir severos daños fue de San Fernando el 9 de febrero de 1971, de  $M=6.2$ . Los acelerogramas de campo libre (no emplazados dentro de edificios) derivados de los obtenidos sobre los estribos de las presas de Pacoima y de Van Norman tienen pulsos de aceleración que devienen en velocidades incrementales muy elevadas ( $158$  y  $172\text{ cm/s}$  respectivamente). Bolt (1975) en alusión a la magnitud, réplicas y dinámica de la falla del terremoto de San Fernando de 1971, dio una detallada explicación del gran pulso de desplazamiento horizontal registrado sobre uno de los estribos de la presa de Pacoima, llamó a los pulsos de velocidad y desplazamiento del suelo "*fling-step*" y afirmó que este tipo de pulsos tenía una explicación teórica en el mecanismo de rebote elástico de la ruptura de la falla. En 1979 el terremoto de Imperial Valley (EEUU) produjo varios registros conteniendo pulsos severos de aceleración velocidad y desplazamiento. El registro obtenido en la estación James Road a  $4.0\text{ km}$  de la falla presentó un pulso largo de aceleración con  $\text{PGA}=0.36\text{g}$  y una velocidad incremental de  $160\text{ cm/s}$ .

En 1987 Anderson y Bertero estudiaron una serie de registros que contenían pulsos de aceleración y sus efectos sobre estructuras flexibles de acero. Encontraron que en regiones geológicas, tales como en las cercanías a fallas, pueden generarse terremotos tipo pulso que tienden a provocar daños en los niveles más bajos de los edificios. Esta parte de los edificios se torna más crítica que la superior debido a la mayor carga axial que soportan las columnas en primeros pisos. Bajo una acción tipo pulso la deformación tiende a concentrarse en los pisos bajos, y por lo tanto, incrementa los efectos de interacción entre el desplazamiento lateral y la carga axial (efecto P-Delta). También encontraron que el PGA no es un parámetro muy preciso para clasificar la severidad de un terremoto de acuerdo al potencial de daño. Este estudio mostró que registros pertenecientes al mismo terremoto pueden tener variaciones importantes en las características dinámicas debido a factores como la geología local, efectos de la propagación de la ruptura y distancia al plano de falla. Así, una estructura emplazada en una región cercana a una falla puede experimentar una respuesta dinámica  $100\%$  mayor que una estructura situada a cierta distancia, aún cuando los picos de aceleración que alcanza el suelo sean muy similares.

Se cree que una de las causas por las cuales estos aspectos no fueron reconocidos con anterioridad, es debido a que el registro del terremoto de El Centro ocurrido en EEUU en 1940, tan ampliamente usado para un sinnúmero de investigaciones, tiene muy pequeño potencial de daño comparado, por ejemplo, con los registros obtenidos muy posteriormente a él, en el terremoto Imperial Valley de 1979.

El paso siguiente a reconocer el carácter impulsivo de los registros cercanos a la falla sismogénica y su potencial de daño asociado, fue analizar la forma de considerar estos aspectos en los códigos de diseño sísmico. De esta manera, los investigadores establecieron coeficientes correctivos para los espectros de diseño sísmico como una manera práctica de ajustar la demanda estipulada hasta este momento en los códigos a los mayores requerimientos en las zonas cercanas a fallas.

Así, a mediados de la década del 1980 el *Base Isolation Subcommittee of the Northern Section of Structural Engineers Association of California* (BISNS-SEAOC) desarrolló factores para corregir las ordenadas espectrales en la banda de periodos sensibles a la velocidad para el diseño de estructuras aisladas sísmicamente; estos factores fueron designados como factores “*near-fault*” (factores de cercanía a falla) y se los identificó con la letra *N*. Los coeficientes fueron posteriormente adoptados por SEAOC para el 1990 *SEAOC Blue Book* y por *International Conference of Building Officials* (ICBO). Esto último sirvió para que el *Uniform Building Code* (UBC) de 1991 introdujera factores *near-fault* relacionados con la proximidad de fallas en los requerimientos de diseño sísmico para estructuras con dispositivos de aislamiento sísmico de base. La forma en que lo hizo fue considerando las magnitudes y tasas de deformación de las fuentes sísmicas (fallas) en la determinación del coeficiente sísmico (Kircher & Associates Consulting Engineers, 2003).

En vista de los resultados obtenidos en los estudios citados, su publicación y presentación en la comunidad internacional de ingeniería sísmica, ha sido sorprendente que hasta 1991 los efectos de los terremotos impulsivos o *near-fault* con gran poder de daño no hayan sido incorporados en los códigos para diseño sísmico.

En torno a los efectos de los sismos *near-source* Iwan and Toki (1998) afirman que ha habido tanto acuerdos como discusiones desde al menos el terremoto de San Fernando en 1971. Sin embargo, este aspecto no fue llevado a un primer plano hasta el terremoto de Landers en 1992 (EEUU) cuando se obtuvieron registros sobre una estación ubicada a pocos kilómetros de la proyección de la traza de la falla sismogénica.

Durante 1993 y parte de 1994, previamente al terremoto de Northridge 1994 (EEUU) y al de Kobe 1995 (Japón) el *Ad Hoc de Ground Motion Committee of the SEAOC Seismology Committee* desarrolló factores para corregir las ordenadas espectrales de diseño en zonas *near-fault* para todo tipo de estructuras. A la región espectral sensible a las aceleraciones del suelo se aplicaba el coeficiente  $N_a$  y a la región espectral sensible a las velocidades del suelo se aplicaba el coeficiente  $N_v$ .

Fue necesario mostrar registros con pulsos severos obtenidos en los terremotos de Northridge (1994) y Kobe (1995) para convencer a los profesionales que en zonas próximas a fallas los pulsos severos de alto poder destructivo son mas bien una característica distintiva que una excepción. (Jennings, 1997; Bolt, 1997).

Al publicar el *Blue Book-1996* la SEAOC afirmaba que los registros obtenidos en el terremoto de Northridge de 1994 en sitios cercanos a la ruptura de la falla proveen una clara evidencia para considerar niveles para el terremoto de diseño más allá del especificado en los códigos vigentes hasta ese momento. Estos registros obtenidos aproximadamente a 5 km de la falla mostraron una aceleración máxima promedio de 0.7 g en contraste con los 0.40 g del PGA “efectivo” en los espectros de diseño recomendados por la SEAOC. En función de estas importantes diferencias halladas el SEAOC Seismology Committee incorporó los factores  $N_a$  y  $N_v$  en la propuesta de diseño basada en resistencia. Sobre esta base el UBC-1997 introdujo factores *near-source* en sus regulaciones para diseño sísmico de estructuras convencionales junto a extensos mapas de fallas y zonas *near-source* para el oeste de los Estados Unidos.

#### 4 TERREMOTOS TIPO PULSO Y EFECTOS DE DIRECTIVIDAD DE LA RUPTURA

El *National Earthquake Hazard Reduction Program* (NEHRP) en sus ediciones de 2000 y 2003 de las *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures* (FEMA 368 y FEMA 450) preparadas para la *Federal Emergency Management Agency* (FEMA) plantean los espectros de diseño a través de un espectro correspondiente a un nivel denominado “terremoto máximo considerado”, el cual queda completamente definido a partir de dos ordenadas características  $S_s$  a un periodo de 0.2 s y  $S_1$  a un periodo de 1.0 s. Para ello incorporó mapas que permiten determinar estas ordenadas espectrales para todas las regiones de los EEUU. Particularmente no discrimina explícitamente las regiones cercanas a fallas activas sino que lo hace a través de los valores que alcanzan  $S_s$  y  $S_1$  en cada lugar.

El *United States Geological Survey* (USGS) está utilizando, para generar los nuevos mapas de riesgo sísmico para el oeste de los EEUU, relaciones de atenuación de próxima generación conocidas como *Next Generation Attenuation Relationships* (NGA). Estas relaciones han sido desarrolladas con base de datos que incluyen registros cercanos a fallas, no obstante, no contemplan los efectos de directividad de la ruptura, concepto que se desarrolla en detalle en el párrafo siguiente y que reviste gran importancia en el estudio del movimiento del suelo en la proximidad de la fuente sísmica.

Es conveniente aclarar que gran parte de la comunidad científica piensa que si bien lo realizado hasta ahora ha sido un paso hacia delante en el reconocimiento de la importancia de los efectos de terremotos impulsivos, muchos otros aspectos aún permanecen sin resolver y requieren mayor investigación.

En cuanto a la consideración de estos aspectos en Sudamérica deben destacarse los trabajos en Chile de Saragoni (Saragoni y Rojas, 2000; Rojas y Saragoni, 2002; Hernández y Saragoni, 2002; Saragoni, 2004; Ruiz y Saragoni, 2004). En estos trabajos, Saragoni comienza identificando aquéllos registros sísmicos *near-source* que, por haber provocado daños y colapsos, cuentan con un cierto nivel de potencia y poder destructivo que los hacen aptos para estudios mediante análisis no lineal. Entre otros aspectos estudió la respuesta de estructuras en condiciones de colapso cuando están sometidas a terremotos impulsivos de gran poder destructivo y observó las grandes demandas inelásticas en brevísimos lapsos de tiempo que imponen este tipo de terremotos.

En la República Argentina no hemos encontrado referencias sobre el fenómeno *near-fault* con anterioridad al año 2003. En cuanto a antecedentes normativos, la única referencia reglamentaria se encuentra en el reglamento INPRES-CIRSOC 103, Parte I de 1991 que establece que en zonas epicentrales en caso de realizar análisis dinámicos lineales por el método de integración directa paso a paso, los acelerogramas a utilizar deben contener pulsos largos e intensos de aceleración.

A partir del año 2003 comienzan los trabajos de Frau y Saragoni (Frau y Silva, 2003; Saragoni, 2004; Ruiz y Saragoni, 2004; Frau y Saragoni, 2005a, 2005b; Frau y Saragoni, 2006a, 2006b; Frau et al. 2007; Frau, Saragoni y Costa, 2009 y Frau, 2009). Estos trabajos abarcan el estudio de la respuesta de sistemas de un grado de libertad ante terremotos impulsivos de gran potencial destructivo, la clasificación las fuentes sismogénicas del centro-oeste argentino desde el punto de vista de la ingeniería sísmica, el mapeo y delimitación preliminar de zonas próximas a fallas activas, las características impulsivas y de gran potencia sísmica de los terremotos argentinos y la instrumentación y base de datos de registros sísmicos en la provincia de Mendoza, Argentina.

Como aspecto final pueden mencionarse los debates en la Comisión Redactora del Proyecto de Reglamento INPRES-CIRSOC 103, Parte I (Balasch et al., 2008), que en virtud de las referencias citadas abordó extensamente la temática *near-fault* y la forma de incorporarla al nuevo reglamento. Afortunadamente la versión a someterse en breve a discusión pública introduce (aunque con valores fijos para todos los casos) factores  $N_a$  y  $N_v$  de modificación de las ordenadas espectrales por cercanía a fallas y deja una puerta abierta para incorporar nuevos factores de acuerdo a las particularidades de cada falla o zona.

## 2. MOVIMIENTO DEL SUELO EN ZONAS ALEDAÑAS A LA FUENTE SISMOGÉNICA

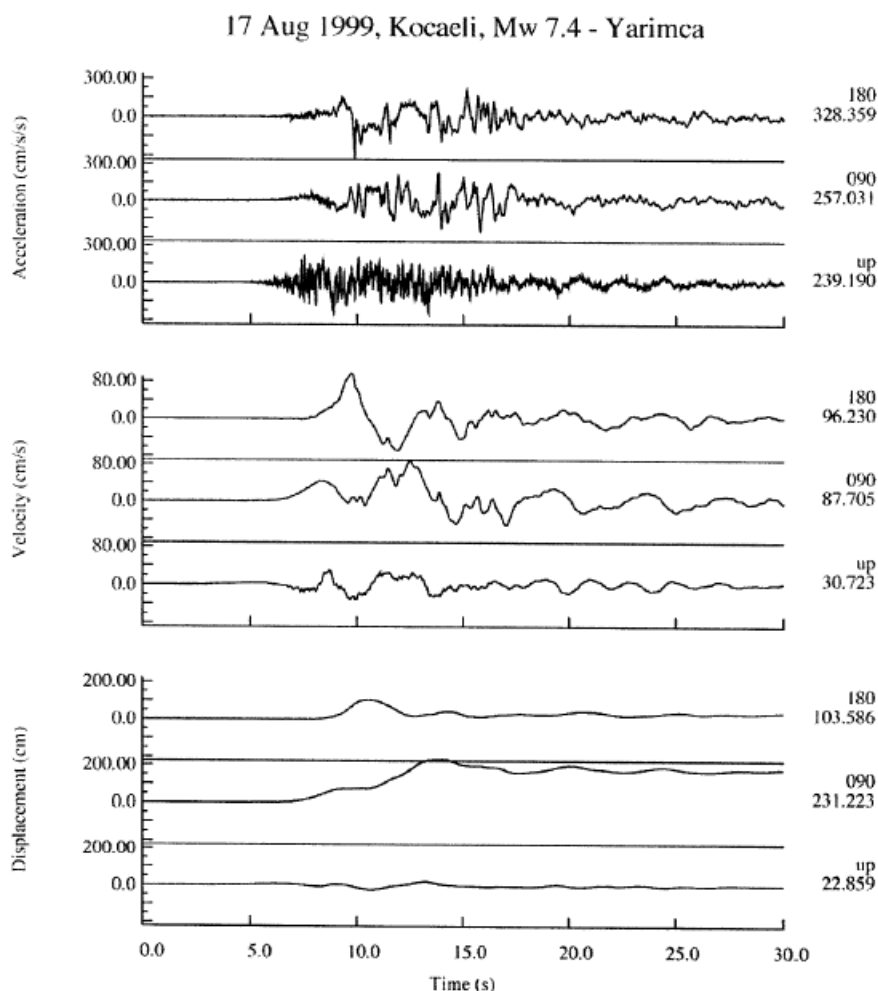
### 2.1 Generalidades

Un terremoto ocurre cuando la energía por deformación elástica que se ha acumulado gradualmente en una falla geológica se libera súbitamente en un proceso denominado “rebote elástico”. El rebote elástico genera movimientos vibratorios (desplazamientos dinámicos) del suelo que pueden durar desde unos pocos segundos hasta algunos minutos constituyendo el principal peligro sísmico. El movimiento genera también desplazamientos permanentes del suelo, fruto del desplazamiento relativo entre ambos bloques de la falla, este desplazamiento decrece gradualmente a medida que aumenta la distancia al plano de falla. Si la ruptura alcanza la superficie, el desplazamiento permanente representa otro de los principales peligros sísmicos. Aún si la ruptura no alcanza la superficie hay deformación permanente de la masa de suelo debido al fallamiento sub-superficial. La Figura 1 muestra el desplazamiento permanente que sufrió un cerco de madera que atravesaba la gran falla transcurrente de San Andreas en el terremoto de San Francisco de 1906 en Punta Reyes (Gilbert, 1907a y 1907b).



**Figura 1.** Cerco de madera que cruza una falla transcurrente que deslizó en el terremoto de San Francisco, EE UU en 1906 (Gilbert, 1907a y 1907b).

En los terremotos como el de Chi-Chi, Taiwán de 1999 y Kocaeli, Turquía de 1999 entre otros, se pudo constatar que el suelo en las inmediaciones de la falla sismogénica presentó tanto vibración (oscilación dinámica) como desplazamientos permanentes. La Figura 2 muestra los registros de aceleración velocidad y desplazamiento del suelo en la falla transcurrente de Anatolia que dio origen al terremoto de Kocaeli, Turquía 1999 en la estación Yarimca. El desplazamiento permanente del suelo es de aproximadamente 2.0 m en la dirección oeste-este (90°) y es paralela a la traza de la falla, este dato es coincidente con los obtenidos a través de mediciones geológica y GPS (Somerville, 2002). El gran pulso de velocidad dinámico está orientado norte-sur (180°) que es normal a la falla y no presenta desplazamiento remanente. El desplazamiento permanente es coincidente en tiempo con el gran pulso de velocidad como muestra la figura y ocurre sobre un intervalo de tiempo de algunos segundos.



**Figura 2.** Registros de aceleración, velocidad y desplazamiento para la estación Yarimca en el terremoto de Kocaeli, Turquía el 17 de agosto de 1999 de  $M=7.4$ . (Somerville, 2002).

## 2.2 Zona cercana a falla

Al espacio territorial que circunda a una falla o fuente sísmica se la denomina zona cercana a falla (*near-source zone* o *near-fault zone*). No existe un criterio unificado entre los investigadores que establezca hasta donde se extiende esta zona y en muchos casos su amplitud varía según el aspecto que se considere.

Según Stewart et al. (2001), la zona cercana a falla puede abarcar sitios ubicados hasta una distancia de 60 km del plano de ruptura de la falla. Coincidentemente con este criterio Abrahamson (2000) fijó en 60 km la distancia límite para cuantificar los efectos de *rupture directivity* (directividad de la ruptura). Por otro lado Bray and Rodríguez-Marek (2004) restringen la zona *near-fault* hasta los 20 km de distancia al plano de ruptura. Si se mira desde el punto de vista vibratorio del suelo, este es comparable al deslizamiento o *slip* medio de la falla y decrece linealmente hasta un factor de 1/3 sobre los 10 km de distancia a la falla (Aagaard et al. 2001). En tanto que el código UBC-1997 al desarrollar los “*Maps of known active fault near-source zones in California and adjacent portions of Nevada*” limitó la zonas *near-fault* a 15 km que se miden horizontalmente a partir de la proyección vertical del área de ruptura sobre la superficie de la tierra.

Si bien la presencia de pulsos severos es principalmente una particularidad de registros en zonas *near-fault*, ha habido casos de terremotos de profundidad intermedia en que estos pulsos han sido registrados también lejos de la fuente sísmica. Tal es el caso del acelerograma de Bucarest cuyo registro se ubicaba a 150 km del epicentro del terremoto de Vrancea, Rumania 1977, que produjo severos daños en edificios modernos en Bucarest (Bertero et al., 1999).

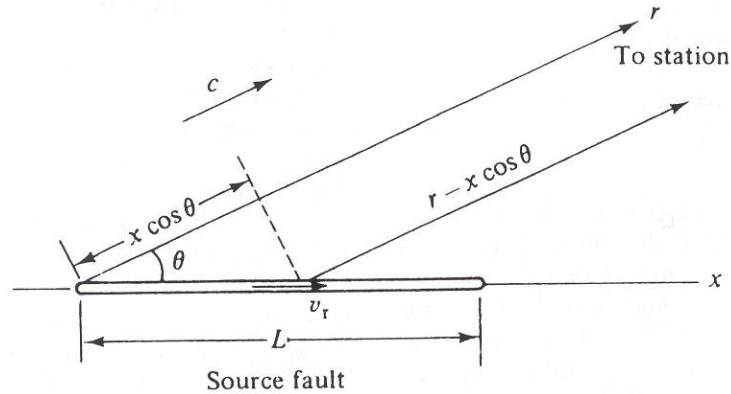
### 2.3. Directividad

Un terremoto es el resultado de una dislocación o ruptura de corte de una falla, comienza en un punto del área de ruptura y se esparce a una velocidad que es muy próxima a la velocidad con que viajan las ondas de corte en la masa de la roca. La propagación de la ruptura en una determinada dirección a velocidad cercana a la que viajan las ondas de corte provoca que, en algunos sitios, gran parte de la energía sísmica proveniente de la ruptura arribe agrupada en pocos pulsos de movimiento que se manifiestan al inicio del registro que lo captura (Somerville et al., 1997; Somerville, 2002). Estos pulsos representan el efecto acumulativo de un alto porcentaje de la radiación sísmica proveniente de la ruptura. El fenómeno conocido como directividad de la ruptura (*rupture directivity*) puede interpretarse análogamente a lo que ocurre con el efecto "Doppler" en sonido que cambia la longitud de onda según la posición del observador.

A pesar de que la ingeniería sísmica tardó en reconocer la importancia de este fenómeno, desde el ámbito geológico era ya conocido con bastante anterioridad. Lay and Wallace (1995) explican que la duración de un pulso de movimiento del terreno asociado a la propagación de una ruptura es función de las dimensiones de la falla y de la velocidad de ruptura; pero también depende de la orientación relativa del observador o punto de registración respecto de la dirección de ruptura.

En general, la velocidad de propagación de la ruptura es menor que la velocidad de las ondas de cuerpo  $S$  viajando por la roca que conforma la falla. Las ondas generadas por la ruptura de un segmento de falla llegarán a un sitio un poco antes que las ondas correspondientes a un segmento que rompa con posterioridad.

Por otro lado, cuando el camino hacia el sitio no es perpendicular a la traza de falla, las ondas generadas en diferentes segmentos de la falla tendrán diferentes longitudes de camino hasta el sitio de registración y así, distintos tiempos de viaje. La Figura 3 muestra una falla de longitud  $L$ , rompiendo de izquierda a derecha. Si la distancia a la estación registradora es  $r$  (con  $r \gg L$ ), el tiempo de llegada de ondas desde el inicio de la falla es  $r/c$ , donde  $c$  es la velocidad de viaje de la onda.



**Figura 3.** Geometría de la ruptura de una falla y el camino hasta un sitio de registración (Lay and Wallace, 1995).

El tiempo de llegada de ondas desde un punto de abscisa  $x$  sobre la falla será (con  $v_r$  velocidad de ruptura).

$$t_x = \frac{x}{v_r} + \frac{(r - x \cos(\theta))}{c} \quad (1)$$

Donde  $\theta$  es el ángulo que forma la dirección de ruptura con el camino de las ondas al sitio de registración. Luego, la diferencia total de tiempo entre la llegada de la energía provenientes del extremo inicial ( $x=0$ ) y final de la falla ( $x=L$ ) será

## 8 TERREMOTOS TIPO PULSO Y EFECTOS DE DIRECTIVIDAD DE LA RUPTURA

$$t_c = \left[ \frac{L}{v_r} + \frac{(r - L \cos(\theta))}{c} \right] - \frac{r}{c} \quad (2)$$

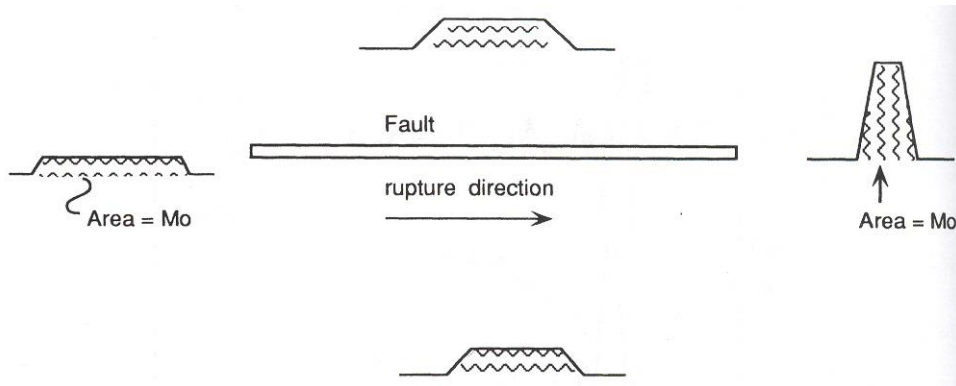
$$t_c = \frac{L}{v_r} - \left( \frac{L \cos(\theta)}{c} \right) \quad (3)$$

La duración del pulso resulta ser una función del azimut del registrador respecto de la dirección de propagación de la ruptura. Esta dependencia del azimut debida a la propagación de la falla es la denominada directividad (*directivity*).

Si la estación sísmica está alineada con la propagación de ruptura ( $\theta=0$ ), la duración del pulso es mínima y la energía se concentra generando un pulso de gran amplitud.

$$t_c = L \left( \frac{c - v_r}{c \cdot v_r} \right) \quad (4)$$

Si la estación está ubicada de manera que la ruptura se aleja del sitio la función tiempo se alarga y la energía se distribuye con baja amplitud.



**Figura 4.** Variabilidad azimutal del tiempo de entrega de la energía para una falla rompiendo unilateralmente (Lay and Wallace, 1995).

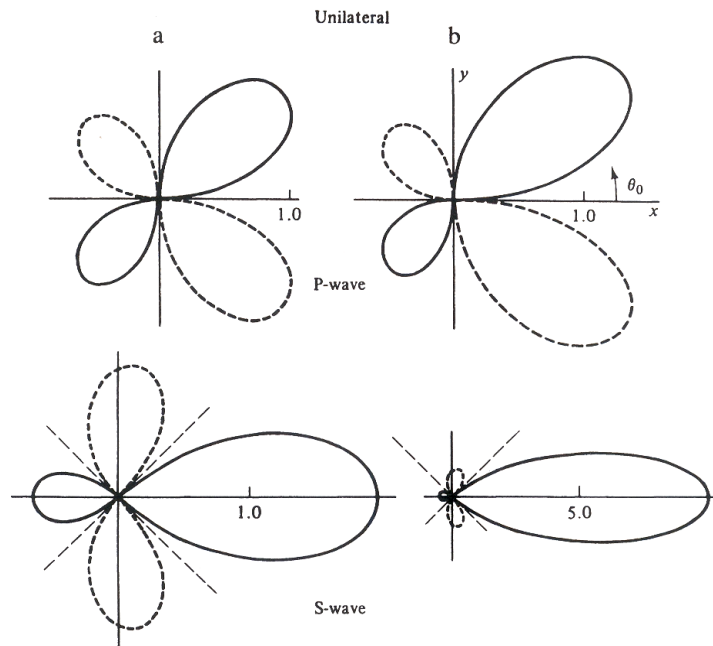
La Figura 4 muestra esquemáticamente la variabilidad azimutal del tiempo de entrega de la energía, el área del pulso es proporcional al momento sísmico  $M_0$ , el cual se puede entender como una medida de la energía liberada y constante para un determinado sismo. Se aprecia que la duración cambia pero el área que representa el momento sísmico es constante e independiente del azimut.

Se sigue que la relación entre la velocidad de ruptura y la velocidad de fase (viaje de la onda) afecta fuertemente la amplitud del movimiento. Tanto como la velocidad de ruptura se aproxime a la de fase, los efectos de directividad se vuelven mas pronunciados.

La Figura 5 muestra la influencia de la relación de velocidades  $v_r/c$  (ruptura/fase) para el caso de las ondas  $P$  y  $S$  en una falla con ruptura unidireccional. Cuando la relación de velocidades pasa de 0.5 a 0.9 la amplitud del movimiento de las ondas  $P$  y  $S$  se magnifica notablemente en la dirección del avance de la ruptura (hacia la derecha) y se reduce para sitios ubicados en dirección contraria a la ruptura (hacia la izquierda). Cuando la ruptura se origina en un segmento central de la falla y se esparce en ambas direcciones se conoce como "ruptura bilateral". En estos casos la duración del pulso no es tan sensible al azimut.



Debido a que las ondas de alta frecuencia son menos propensas a viajar de manera coherente, las aceleraciones de suelo son relativamente menos sensibles a ser afectadas por los efectos de directividad (Malhortra, 1999). Así, los efectos relacionados con largos periodos se observan mejor en los registros de velocidad del suelo (Bray and Rodríguez-Marek, 2004).



**Figura 5.** Variabilidad de la amplitud de las ondas S y P para una propagación de ruptura de falla desde la izquierda hacia la derecha. Para la columna de la izquierda  $v_r/c = 0.5$  y para la columna de la derecha  $v_r/c = 0.9$ .

## 2.4. Directividad hacia delante y hacia atrás

La directividad puede presentarse dando lugar a efectos de directividad de la ruptura hacia delante (*forward rupture directivity*) o directividad de la ruptura hacia atrás (*backward rupture directivity*). Debe observarse que, aún cuando las condiciones para el efecto de directividad estén dadas, el efecto puede no presentarse; es el caso que se dice directividad neutra (*neutral directivity*).

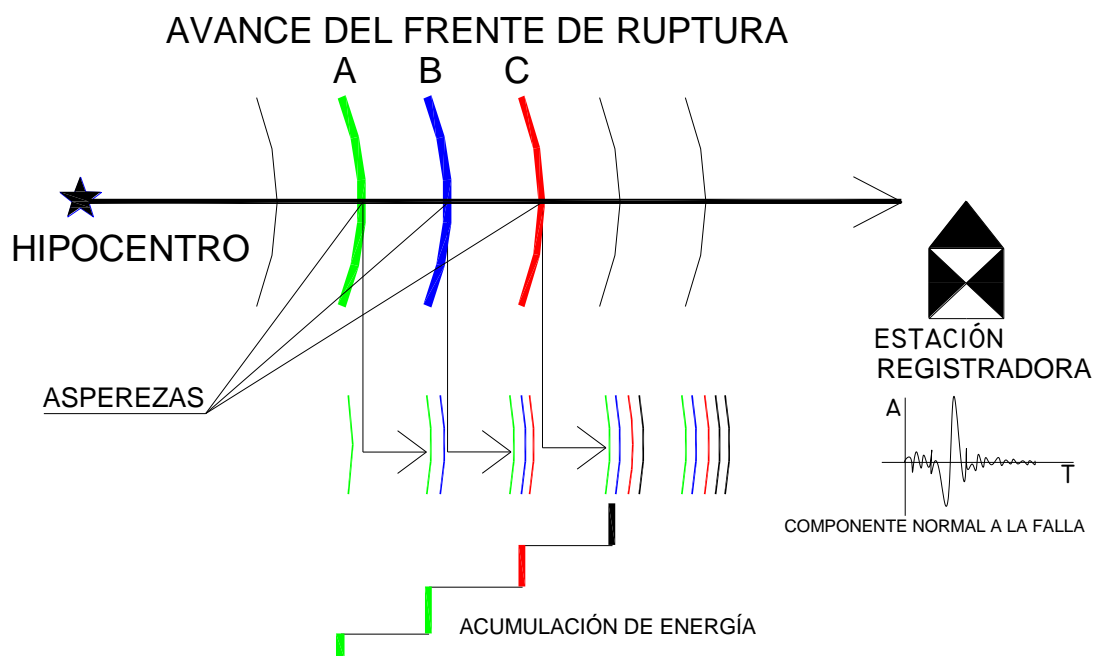
Las condiciones para que la directividad hacia delante ocurra son: que el frente de ruptura se propague hacia el sitio y que la dirección de deslizamiento de la falla esté alineada con él. Estas condiciones se dan claramente en fallas fallas transcurrentes (*strike-slip*), donde la ruptura se propaga horizontalmente en la dirección de la traza hacia uno o hacia ambos extremos a la vez que la dirección del deslizamiento es también horizontal según la traza; el efecto es particularmente importante durante una ruptura unilateral (desde el foco hacia uno solo de los extremos). El efecto de directividad hacia atrás ocurre cuando la ruptura se propaga alejándose del sitio dando un efecto opuesto: movimientos de larga duración, bajas amplitudes y largos periodos.

La directividad hacia delante se manifiesta también en fallas inversas o normales (*dip-slip faulting*). La alineación de la dirección de ruptura y dirección de deslizamiento sobre el plano de falla produce efectos de directividad en los sitios ubicados alrededor de la superficie expuesta de la falla o bien de la traza que surge de prolongar el plano de ruptura hasta la superficie si no aflora (Somerville, 2002).

Al derivar la ecuación (4) que establece la duración del tiempo del pulso para el azimut con directividad máxima ( $\theta=0$ ) se partió de la hipótesis de que la ruptura es un proceso continuo y uniformemente distribuido a lo largo del plano de falla. En realidad esto no es cierto. Las superficies de ruptura presentan un número limitado de barreras o asperezas distribuidas en forma aleatoria que hacen la "traba" del área de ruptura y que son las que se rompen durante un sismo. Sobre esto Somerville and Smith (1996) y Somerville et al. (1997) afirman que el frente de ruptura avanza con liberaciones escalonadas de energía en correspondencia con la ruptura de estas asperezas. Así, el frente de ruptura al alejarse del hipocentro y aproximarse al sitio, va acumulando energía de ruptura

en cada sucesivo deslizamiento de la falla (según la distribución de asperezas) y al llegar al sitio conforma un gran pulso de movimiento al inicio del registro conocido como efecto de golpe de onda (*shock wave effect*).

Este pulso de movimiento se caracteriza por su gran amplitud, periodo intermedio a largo y corta duración. El esquema de la Figura 6 muestra esquemáticamente cómo se genera el efecto de directividad hacia delante para rupturas discretas según asperezas. Sobre este aspecto Somerville et al. (1999) desarrollaron modelos basados en datos empíricos y simulaciones para modelar cómo se distribuye el deslizamiento a lo largo de la superficie de ruptura.



**Figura 6.** Efecto de directividad hacia delante para rupturas según asperezas del plano de falla (Frau y Saragoni, 2005a).

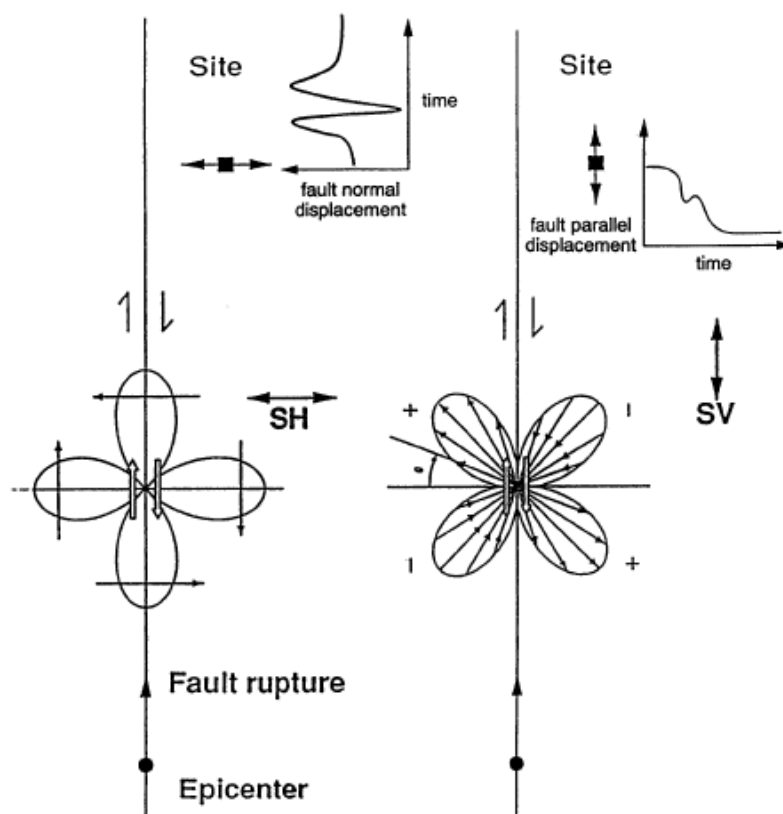
## 2.5. Patrones de radiación

En el ámbito sismológico se denomina patrón de radiación a la asimetría geográfica espacial del movimiento del suelo a causa del proceso de ruptura del mecanismo del terremoto y está estrechamente relacionada al mecanismo de la falla. El patrón de radiación puede ser modificado o perturbado por efectos de directividad de la ruptura, la cual provoca un incremento o disminución del movimiento del suelo como resultado de la propagación de la ruptura. El resultado de la directividad se puede manifestar amplificando el movimiento del suelo en el sentido de avance de la ruptura y atenuándose cuando la propagación se aleja del sitio.

El concepto general de patrón de radiación y directividad de la fuente para una falla transcurrente con plano de ruptura vertical se esquematiza en la Figura 7. El diagrama de la izquierda (SH) corresponde a las ondas transversales S en un plano vertical y normal a la dirección de propagación, es decir deformación de corte puro. El diagrama de la derecha corresponde a un plano horizontal paralelo a la dirección de propagación (designada como SV en la Figura 7) y los lóbulos deben entenderse de manera que los vectores salientes representan dilatación (sentido positivo en la dirección de la traza), en tanto que los entrantes representan compresión (sentido negativo); así una partícula ubicada del lado derecho de la falla experimenta una oscilación mas una traslación o corrimiento permanente en la dirección paralela a la falla.

Si en la misma figura observamos las curvas de desplazamientos versus tiempo para la dirección normal y paralela a la falla, vemos que la dirección normal presenta grandes pulsos en ambos sentidos con desplazamientos remanentes prácticamente nulos. En cambio, si nos

detenemos en la dirección paralela cada punto sobre uno de los lados de la falla acusa un primer desplazamiento casi instantáneo en correspondencia con el deslizamiento y luego aparecen uno o dos pulsos restitutivos que reducen el desplazamiento pero igual lo dejan con un corrimiento permanente.



**Figura 7.** Patrones de radiación para una falla transcurrente con plano de falla vertical y sus efectos sobre las componentes normal y paralela a la falla (Somerville et al., 1997).

## 2.6. Componentes del movimiento

En la zona cercana a falla el movimiento del terreno contiene pulsos de ondas que dominan el movimiento horizontal pudiendo manifestarse como pulsos simples o dobles y con amplitudes en uno o ambos sentidos. Las características de estos pulsos dependen del tipo, longitud distribución de las asperezas y complejidad de la ruptura. Así, en el movimiento de suelo en presencia de directividad se pueden diferenciar dos aspectos. El primero, de carácter dinámico, se refiere al movimiento impulsivo que concentra gran parte de la radiación fruto del efecto de directividad hacia delante; el segundo, de carácter estático, se refiere al corrimiento o desplazamiento permanente del suelo como resultado del deslizamiento relativo de ambos bloques de la falla. Para identificar estas dos componentes del movimiento en forma separada los términos “*directivity pulse*” y “*fling step*” han sido utilizados en la literatura para designar el “pulso por directividad de la ruptura” y el “salto de desplazamiento” fruto del rebote elástico respectivamente (Bolt, 2003).

Tanto en las fallas del tipo transcurrentes como en fallas de tipo inversas, el movimiento dinámico, fruto del patrón de radiación de la dislocación de corte, provoca que el pulso por directividad se orienten según una normal al plano de la falla. Los efectos típicos son pulsos de periodo largo y se observan mejor en la historia de velocidades del suelo. En general este efecto de carácter dinámico no produce desplazamientos permanentes de importancia

El “*fling-step*” representa el desplazamiento tectónico unidireccional del suelo en las inmediaciones de la falla, ocurre cuando el sitio está ubicado cerca de una falla sísmogénica con

significativa superficie de ruptura y actúa sobre la componente paralela a la dirección del deslizamiento (Howard, Tracy and Burns, 2005). En fallas transcurrentes donde la ruptura se propaga a lo largo de la traza, el *fling-step* es horizontal en dirección de la traza. En fallas inversas o normales la resolución vectorial de *fling-step* y el *directivity pulse* es más compleja. Aunque el pulso de directividad es más fuerte sobre la componente normal en sitios ubicados directamente por encima del hipocentro, el *fling-step* puede tener componente horizontal normal a la traza. De esta manera, en fallas inversas o normales, los efectos del pulso de directividad y *fling-step* pueden ocurrir sobre la misma componente.

Los efectos de *fling-step* han recibido menos atención que los pulsos por directividad de ruptura, los terremotos de Turquía y Taiwán 1999 presentan registros cercanos a la falla con marcados desplazamientos debidas la deformación estática del terreno. La deformación permanente del suelo asociada a la superficie de ruptura observada en estos terremotos han puesto de manifiesto la importancia del *fling-step* sobre el desempeño de edificios y líneas vitales (infraestructura) que cruzan o están cerca de fallas (Stewart et al., 2001).

Para la estimación del máximo desplazamiento estático  $MD$  Wells and Coppersmith (1994) desarrollaron la siguiente regresión donde  $M$  es la magnitud momento y el resultado viene dado en metros.

$$\log(MD) = -5.46 + 0.82M \quad (5)$$

Byerly and De Noyer (1958) identificaron al desplazamiento estático como “desplazamiento tectónico” (TD) proponiendo la siguiente expresión para estimarlo en función de la distancia normal a la traza de la falla  $r_n$  en km (Stewart et al., 2001).

$$TD = 194 \cot^{-1}(0.325 \cdot r_n) [cm] \quad (6)$$

El desplazamiento estático se precipita luego de algunos segundos de que se desarrolle la ruptura en la dirección del deslizamiento y, por lo tanto, no está fuertemente acoplado con el desplazamiento dinámico. Es por esto, que resulta necesario considerar las componentes dinámicas y estáticas como acciones sísmicas no excluyentes entre si (Somerville, 2002).

En cuanto al movimiento rotacional del suelo, existen muy pocas mediciones. Algunas miden directamente la rotación y otras los hacen mediante un arreglo de mediciones traslacionales. Los resultados muestran que la velocidad media de rotación del suelo es aproximadamente 1%/s (Somerville, 2005).

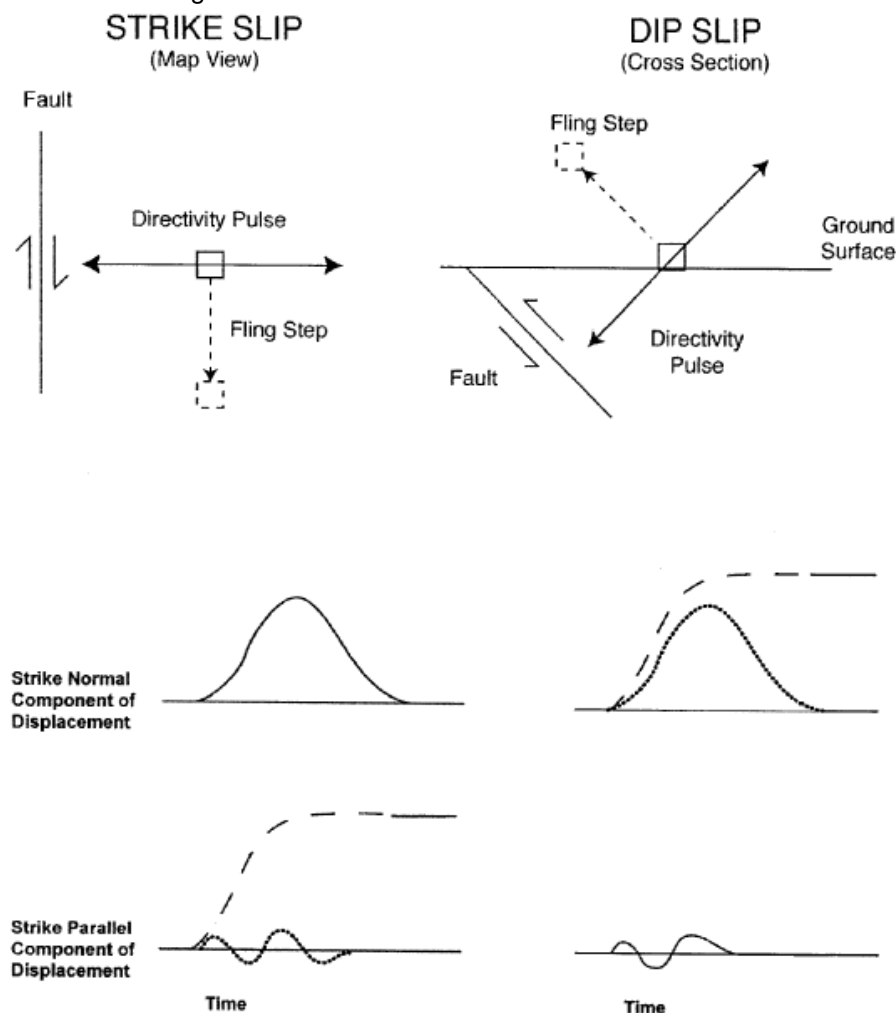
## 2.7. Orientación de los pulsos

Se analiza a continuación la orientación que presentan los pulsos por directividad y por desplazamiento estático (*fling-step*) tanto para el caso de fallas transcurrentes como para fallas inversas o normales. La parte superior de la Figura 8 ilustra esquemáticamente los movimientos dinámicos y estáticos del terreno en la zona *near-fault*.

Para fallas transcurrentes (izquierda) el dibujo es una vista en planta donde la traza de la falla define la dirección del deslizamiento. El pulso por directividad de la ruptura se orienta según una normal a la traza en un plano horizontal, en tanto que el *fling-step* queda orientado según la dirección de la falla.

Para el caso de fallas inversas (derecha) la misma Figura 8 muestra una sección vertical, donde la traza de la falla es normal al papel. El pulso por directividad se orienta en la dirección normal al plano de falla, y tiene componentes vectoriales en la dirección horizontal y vertical (paralela y perpendicular a la superficie de suelo). El desplazamiento estático o *fling-step* se orienta en la dirección paralela a la recta de máxima pendiente del plano de falla, teniendo también componentes horizontal y vertical. Esto explica las altas aceleraciones verticales registradas en terremotos con origen en fallas inversas como el de Nahanni, Canada, 1985 ( $M=6.8$ ) donde según el *Pacific*

Earthquake Engineering Research Center (PEER) se registraron aceleraciones verticales que alcanzaron el valor de 2.08 g.



**Figura 8.** Arriba: Orientación esquemática del pulso por directividad de ruptura y desplazamiento estático (fling step) para fallas transcurrentes (izquierda) y fallas inversas (derecha). Abajo: descomposición esquemática del pulso por directividad de ruptura y desplazamiento de la falla en la componente normal y paralela. Los pulsos conteniendo desplazamiento estático se indican con línea de trazos (Somerville et al, 1997).

La parte inferior de la Figura 8 desglosa el movimiento del suelo *near-fault* en un movimiento dinámico, el cual es gobernado por el pulso de directividad de ruptura y el desplazamiento estático. Para fallas transcurrentes, el pulso por directividad de ruptura conforma principalmente la componente normal a la falla y el desplazamiento estático participa en su mayor medida en la componente paralela. Si el desplazamiento estático se remueve de la componente paralela un muy pequeño movimiento dinámico permanece (línea de puntos apretados).

En una falla inversa, los desplazamientos estáticos y dinámicos se suceden juntos sobre la componente normal y queda poco de cada uno de estos movimientos sobre la componente paralela. Si el desplazamiento estático se remueve de la componente normal, aún un gran pulso de directividad de media onda permanece (línea de puntos apretados).

En muchos casos el carácter impulsivo de los registros *near-fault* puede no ser evidente en el registros de aceleraciones, pero la historia de velocidades y de desplazamientos revelan la naturaleza especial del movimiento del suelo en la zona *near-fault*. En general, en registros *near-fault*, el PGV es sustancialmente mayor que en los registros ordinarios denominados *far-field* (campo lejano) y el *fling-step* es generalmente caracterizado por un pulso de velocidad unidireccional y por una escalada monótonica en el registro de desplazamientos como se mostró en la Figura 8 (Bray and Rodríguez-Marek, 2004).

El estudio de varios registros *near-fault* muestran que los efectos de directividad, fruto de la interferencia constructiva de ondas, pueden aumentar la amplitud del pulso de velocidad por un factor de diez y reducir la duración por un factor de dos (Bolt, 2003). Además de presentarse pulso simple o múltiple, puede variar también la forma en que se inicia el pulso y el periodo o duración de la media onda.

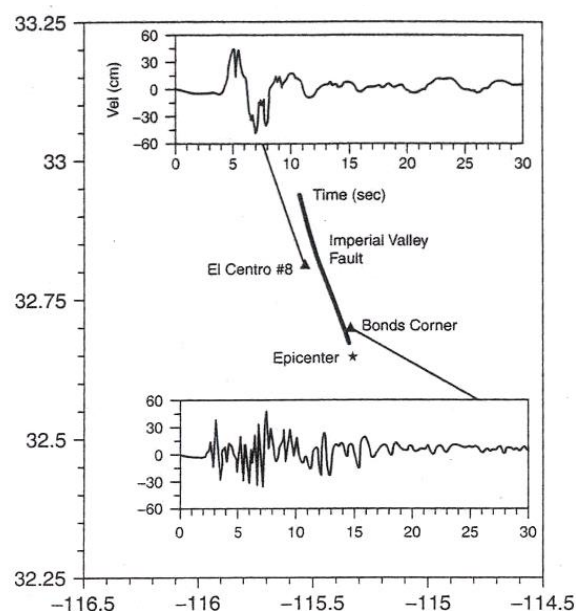
## 2.8. Casos y ejemplos

Estudios de simulación sísmica llevados a cabo por Aagaard et al. (2001) confirmaron varias características distintivas del movimiento del suelo en la zona *near-fault*. En fallas transcurrentes encontraron que la directividad causa que el PGD aumente a lo largo de la traza de la falla desde el epicentro hasta su extremo, desde donde decae rápidamente con la distancia. También reconocieron que el movimiento más severo se da en la dirección normal a la falla. Por otro lado, el movimiento de suelo con directividad hacia delante presenta un doble pulso de velocidad asociado a ondas tipo Rayleigh y en correspondencia con este doble pulso un pulso de desplazamiento simple.

Tanto en fallas transcurrentes como inversas estudios de simulación sísmica mostraron que los movimientos con *backward directivity* (directividad hacia atrás) resultaron mucho más pequeños a la vez que la disminución en la profundidad del foco provoca un movimiento más severo con mayores amplitudes de las ondas de superficie. Así, el movimiento del suelo en superficie presenta gran sensibilidad a la profundidad de la falla. Se confirmó que a medida que aumenta la velocidad de ruptura, se vuelve más eficiente la interferencia constructiva de las ondas de corte en fallas transcurrentes y de las ondas Rayleigh en fallas inversas. Tal fue el caso de la velocidad media de ruptura para la falla sismogénica del terremoto de Chi Chi Taiwán de 1999, la cual fue obtenida por diferencia de fase de ondas Rayleigh por Hwang et al. (2001) y alcanzó 2.27 km/s, esto es un 76% de la velocidad de la onda de corte en la parte superior de la corteza que fue de 3.0 km/s. El tiempo del deslizamiento medido (*rise time*) fue de 6.7 s.

### Terremoto Imperial Valley de 1979

Otro caso ilustrativo son los registros de velocidad en el terremoto de Imperial Valley, California en 1979. En este caso la ruptura se dirigió hacia la estación El Centro, alejándose de la estación Bonds Corner. La Figura 9 muestra la traza de la falla, el epicentro y los registros de velocidad correspondientes a la estación El Centro #8 con directividad hacia delante y la estación Bonds Corner con directividad hacia atrás.

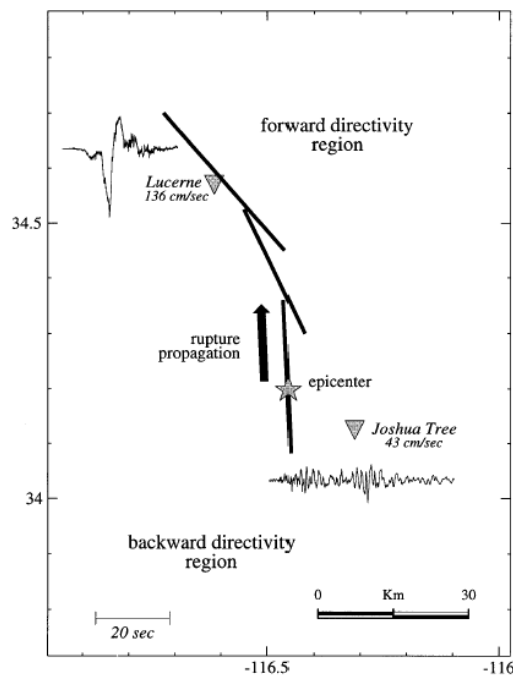


**Figura 9.** Historia de tiempo de las velocidades de las estaciones de Bonds Corner y El Centro #8 para el terremoto Imperial Valley, California 1979 (Bolt y Abrahamson, 2003).

### Terremoto de Landers de 1992

Con anterioridad a los terremotos de Turquía y Taiwán 1999, prácticamente todos los pulsos de periodo largo observados en registros *near-fault* fueron causados por efectos de directividad de ruptura. El registro de Lucerne en el terremoto de Landers de 1992, California, contiene un pulso de directividad sobre la componente normal a la falla y un pulso de desplazamiento del suelo de periodo largo en la componente paralela a la falla.

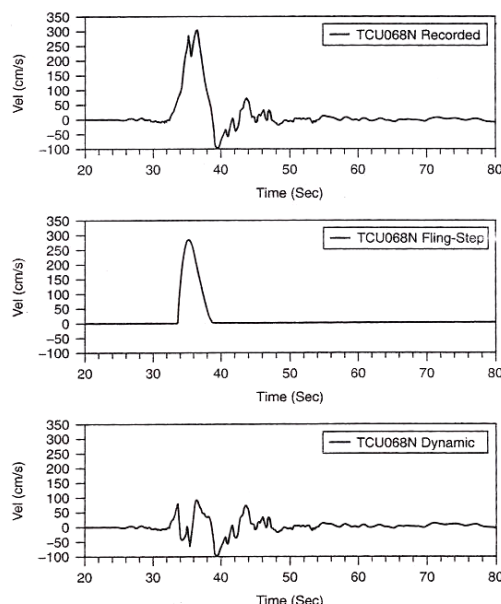
Un claro ejemplo de los efectos *forward directivity* y *backward directivity* se pudo identificar en la región de Landers, EEUU durante el terremoto homónimo. Este caso está representado en la Figura 10, donde se observa el mapa con un trazo grueso que indica la ubicación de la ruptura que abarcó tres segmentos de falla y el sentido de ruptura. Se indican también el epicentro y la estación registradora de *Lucerne* ubicada en zona de directividad hacia delante y la de *Joshua Tree* en zona de directividad hacia atrás. Junto a los triángulos que indican la posición de las estaciones registradoras están los registros de velocidad en dirección normal a la falla que muestran claramente los efectos de directividad hacia delante y hacia atrás respectivamente.



**Figura 10.** Mapa de la región de Landers mostrando la presencia de directividad hacia delante y hacia atrás en la ruptura del terremoto de Landers de 1992, (Somerville et al. 1997).

### Terremoto de Chi-Chi, Taiwán 1999

El terremoto de Chi-Chi, Taiwán también presenta ejemplos de pulsos largos de velocidad. Citemos como por ejemplo el registrado en la estación TCU068 para la componente norte sur. Dado que la fuente sismogénica de este terremoto fue una falla inversa, el pulso por directividad y *fling-step* se confunden al desarrollarse ambos en una dirección normal a la falla. La Figura .11 muestra el registro de velocidades que presenta el efecto del *fling-step* mediante un pulso de velocidad de gran amplitud sobre un solo lado. Si se separa el *fling-step* de la vibración dinámica el pico de velocidad de esta última se reduce al 30%.



**Figura 11.** Registro de velocidad para la componente norte-sur de la estación TCU068 en el terremoto de Chi Chi. Se ha desglosado el *fling-step* de la componente dinámica (Bolt, 2003).

#### *Terremoto de Parkfiel de 2004*

Datos obtenidos por Shakal et al. (2005) sobre el terremoto de Parkfield, California del 28 de septiembre de 2004 con magnitud  $M_w=6.0$  sobre la falla de San Andreas indican que este terremoto presentaba alta probabilidad de ocurrencia y por lo tanto era esperado. Así, se dispuso a lo largo de la falla una densa red de instrumentos. En primeras instancia dos aspectos sobresalientes arrojaron los datos allí obtenidos. En primero fue que al analizar la intensidad del movimiento a lo largo de la zona de ruptura, ésta presenta una gran variabilidad de un punto a otro. El segundo se refiere a las elevadísimas aceleraciones que se alcanzaron a lo largo de la zona de ruptura llegando en un caso a ser mayor que 2.5 g.

#### *Terremoto de Wenchuan de 2008*

Sobre fines del año 2008 Li et al, (2008) publicaron un análisis preliminar del terremoto de Wenchuan, China del 12 de mayo de 2008. Este es uno de los terremotos corticales de mayor magnitud registrada ( $M_s=8.0$ ), las estimaciones arrojaron más de 70.000 muertos. La falla tuvo una longitud de ruptura comprendida entre 250 y 300 km, es del tipo inversa con componentes de rumbo y se observaron desplazamientos verticales de hasta 5.0 m. Las aceleraciones máximas medidas alcanzan 1.0 g y sus curvas de atenuación estarían por encima de las previstas por Sadig et al. (1997) para California, por Fukushima et al. (1990) para Japón y por Wang et al. (2000) para el oeste de China; especialmente para distancias mayores a 100 km, su ley de decrecimiento con la distancias resulta más lento también.

## 3. REPRESENTACION DEL MOVIMIENTO DEL SUELO CON DIRECTIVIDAD

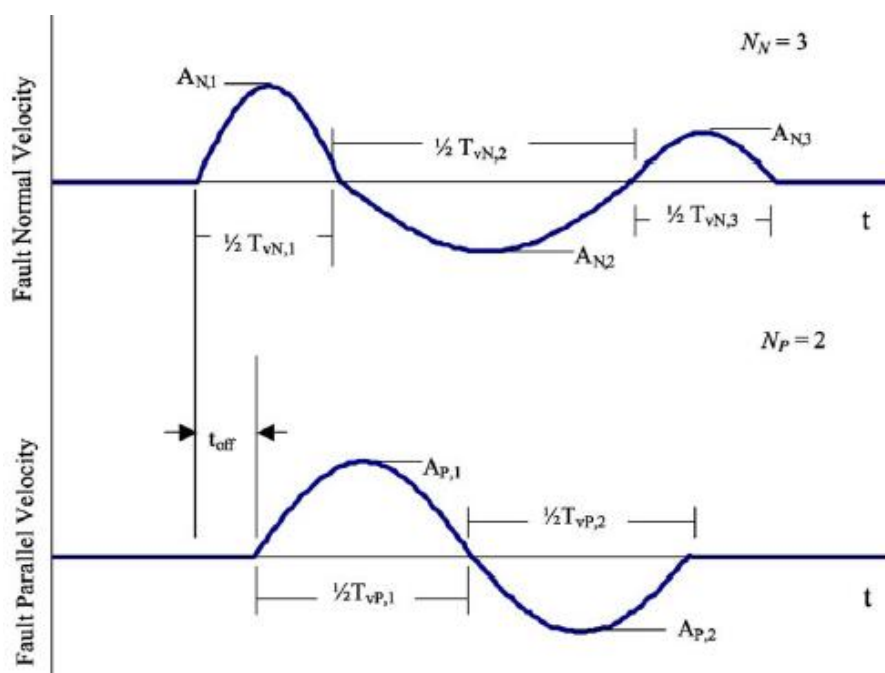
### 3.1. Pulso de velocidad equivalente

La caracterización del movimiento del suelo en el dominio de la frecuencia mediante espectros de respuesta implica un proceso estocástico teniendo una relativa uniformidad en la distribución de la energía en toda la duración del movimiento. Recientes investigaciones sobre la respuesta de estructuras en regiones *near-fault* sugieren que puede ser conveniente y de utilidad una representación simplificada en el dominio del tiempo de los pulsos del movimiento del suelo afectado



por directividad (Somerville, 1998; Somerville et al., 1999; Somerville, 1999, 2000; Sasani and Bertero, 2000; Rodríguez-Marek, 2000; Somerville, 2001; Alavi and Krawinkler, 2001; Somerville, 2002 y Bray and Rodríguez-Marek, 2004). Esta conveniencia se funda en los siguientes aspectos: a) el efecto predominante en la respuesta del mayor pulso de velocidad del registro y que permite utilizar sólo el segmento del registro real que presenta el mayor pulso y b) a los fines prácticos en zonas de carencia de registros, resulta de interés parametrizar pulsos equivalentes para distintas magnitudes y distancias para que puedan utilizarse en diseño.

El análisis de sistemas elásticos e inelásticos de múltiples grados de libertad indican que la amplitud y periodo del pulso en la historia de velocidades del suelo es el parámetro que controla el desempeño de la estructura. Sasani y Bertero (2000) y Alavi y Krawinkler (2001), demostraron que representaciones simples del pulso de velocidad son capaces de capturar las características sobresalientes de la respuesta de estructuras a sismos *near-fault*. La representación del pulso de velocidad real mediante un pulso equivalente puede realizarse mediante pulsos artificiales para la historia de tiempo de las velocidades definidos por el número de semiciclos  $N$ , el periodo del pulso  $T_v$  y la amplitud del pulso  $A_v$  (Rodríguez-Marek, 2000; Bray and Rodríguez-Marek, 2004). La Figura 12 muestra un esquema del pulso de velocidad equivalente y los parámetros que lo caracterizan para el movimiento normal y paralelo a la falla. En ella  $A_{Ni}$  son las amplitudes de cada semionda,  $T_{vNi}$  los tiempos o periodos de cada onda y  $N_N$  el número de semiondas en la dirección normal a la falla. En tanto que  $A_{Pi}$ ,  $T_{vPi}$  y  $N_P$  son los mismos parámetros para la dirección paralela a la falla.



**Figura 12.** Parámetros requeridos para definir componente normal y paralela a la falla de pulsos de velocidad simplificados (Bray and Rodríguez-Marek, 2004).

En cuanto a la amplitud del pulso  $A_v$ , Alavi y Krawinkler (2001) determinaron la amplitud del pulso equivalente haciendo mínimas las diferencias entre la máxima demanda de ductilidad global para el registro completo y la correspondiente demanda obtenida para el pulso equivalente. Los resultados indicaron que en la mayoría de los casos la amplitud del pulso equivalente se encuentra cercana al PGV del registro, con una variación del 20%.

Menun y Fu (2002), encontraron que las amplitudes de sus pulsos sintéticos de velocidad y sus ordenadas de pseudos-velocidad coincidían bastante bien con los respectivos parámetros del registro real. Confirmaron que el uso del *Peak Ground Velocity* PGV (pico de velocidad del suelo) es adecuado como representación de la amplitud del pulso de velocidad en el dominio del tiempo.

Respecto del periodo del pulso  $T_v$ , se admite considerar para su estimación los cruces por cero en el registro real de velocidad o bien cuando la velocidad alcanza el 10 % de la velocidad máxima. Alavi and Krawinkler (2001) identifican el periodo del pulso de velocidad como el periodo

correspondiente a un marcado pico general en el espectro de velocidades denominado  $T_{v-p}$ . Para pulsos simples (de una sola onda) ambos procedimientos llevan a resultados similares pero para pulsos más complejos puede haber diferencias significativas. En general la relación entre  $T_v$  y  $T_{v-p}$  es de 0.84 con desviación estándar de 0,28. La coincidencia entre ambos periodos se puede interpretar diciendo que la energía del terremoto se concentra en una estrecha banda de frecuencias.

El número de semiciclos o de pulsos significativos  $N$  se define como el número de semiciclos de velocidad cuyas amplitudes son al menos el 50% de la máxima velocidad del suelo (PGV). Para evaluar el número de pulsos significativos se considera sólo la componente normal a la falla. Este porcentaje es en realidad arbitrario y el número de medios ciclos es bastante sensible a este valor. Somerville (1998) sugirió que el número de semiciclos en el registro de velocidad está relacionado con el número de asperezas en la falla, lo que en definitiva está vinculado a cómo se distribuye el deslizamiento en el plano de ruptura. Rodríguez-Marek encontró sobre 48 registros estudiados que el 50% de los registros presentaba dos medios ciclos y el 15% presentaba tres medios ciclos. De estos resultados se admite que el uso de dos, o en su defecto tres, medios ciclos es un valor aceptable.

### 3.2. Estimación del pulso de velocidad equivalente

La amplitud  $A_v$  y el periodo  $T_v$  de pulsos de velocidad medidos en registros reales *near-fault*, junto a la magnitud del terremoto que les dio origen pueden utilizarse para el desarrollo de regresiones que permitan construir pulsos equivalentes o pulsos sintéticos de velocidad. Estas regresiones pueden utilizarse para calcular  $A_v$  y  $T_v$  para un terremoto de diseño adoptado y un sitio específico y así construir el pulso de velocidad equivalente para usarlo como *input* en análisis estructural. Estas regresiones resultan de gran utilidad en regiones donde el número de registros de fuertes terremotos es muy reducido, como es el caso de Argentina.

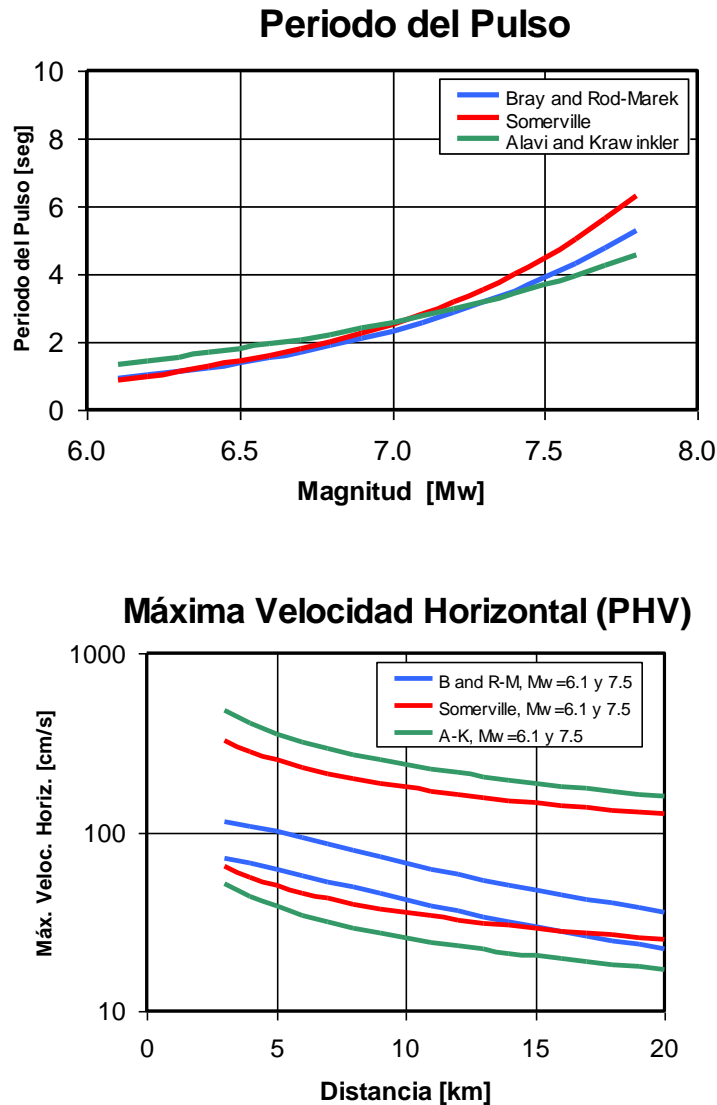
Tabla 1. Regresiones para los parámetros del pulso de velocidad equivalente

Somerville (1999)	$\log_{10} T_v = -3.1 + 0.5M_w$ (7)
	$\log_{10} A_v = -1.0 + 0.5M_w - 0.5\log_{10} R$ (8)
	$\log_{10} t_r = -3.34 + 0.5M_w$ (9)
Alavi and Krawinkler (2000)	$\log_{10} T_v = -1.76 + 0.31M_w$ (10)
	$\log_{10} A_v = -2.22 + 0.69M_w - 0.58\log_{10} R$ (11)
Bray and Rodríguez-Marek (2004) (*)	$\log_{10} T_v = -2.77 + 0.44M_w$ (12)
	$\log_{10} A_v = 1.96 + 0.15M_w - 0.57\log_{10}(R^2 + 49)$ (13)

(\*) Las ecuaciones originales con funciones *logaritmo natural* fueron transformadas a  $\log_{10}$  para facilitar su comparación.

La Tabla 1.1 presenta un resumen de las principales regresiones obtenidas por distintos investigadores, en las cuales  $T_v$  es el periodo del pulso de velocidad en segundos,  $A_v$  es la máxima amplitud del pulso de velocidad horizontal en cm/seg,  $t_r$  el tiempo de ruptura de la falla en segundos,  $R$  la distancia al plano de ruptura en km y  $M_w$  la magnitud momento.

En la Figura 13 se han representado las curvas para el periodo del pulso  $T_v$  y la máxima velocidad horizontal  $A_v$  (Ecs. 7, 8, 10, 11, 12 y 13) para valores de magnitud de 6.1 y 7.5 para distancias que van desde los 3 hasta los 20 km. Las distintas regresiones para  $T_v$  son prácticamente coincidentes para el rango de magnitudes de interés ingenieril. Las curvas de  $A_v$  muestran que las regresiones de Somerville y las de Alavi-Krawinkler se asemejan dando excesivas variación con la magnitud; por ejemplo para una distancia de 10 km  $A_v$  según Alavi-Krawinkler pasa de 0.25 m/s para  $M=6.1$  a 2.37 m/s para  $M=7.5$ . Las regresiones para  $A_v$  de Bray-R-Marek aparecen menos dependientes de la magnitud aunque decreciendo más rápidamente con la distancia y se muestran como las más apropiadas por estar inferidas a partir de una base de datos más actualizada y porque incluye distintos tipos de fallas (inversas y transcurrentes).



**Figura 13.** Curvas para la amplitud y para el periodo del pulso de velocidad horizontal equivalente (Frau y Saragoni, 2005b).

De las regresiones establecidas por Somerville (1999) en la Tabla 1 para el periodo del pulso y la duración de la ruptura (Ecuaciones 7 y 9) se obtiene que ambos parámetros se relacionan por la ecuación (15)

$$T_p = 1.75 \cdot t_r \quad (15)$$

Lo que significa que el periodo del pulso es casi dos veces el tiempo de ruptura. Esta relación es consistente con el hecho de que el tiempo de ruptura es un límite inferior para el periodo del pulso. Si la falla fuera una fuente puntual, luego el único parámetro de la fuente sísmica que contribuiría al periodo del pulso sería el tiempo de ruptura y el periodo del pulso sería igual al tiempo de ruptura. Desde que la falla tiene longitud finita y la velocidad de ruptura es levemente inferior a la velocidad de propagación de las ondas de corte, resulta un “estiramiento del periodo del pulso y por efecto de la directividad la acumulación de energía deviene en pulsos de gran amplitud.

### 3.3. Modelos de pulsos equivalentes

Aún cuando el movimiento real del suelo en la zona *near-fault* no pueda ser representado completamente por medio de pulsos simples, su estudio resulta útil (Sasani and Bertero, 2000). Sin embargo, no se debe esperar una perfecta coincidencia entre los efectos de un registro real y la representación mediante pulsos simples, pues los registros *near-fault* contienen componentes de alta frecuencia generados por la propagación de la ruptura de la falla que modifican la respuesta estructural. Menun y Fu (2002) desarrollaron modelos de pulsos cuya forma es más compleja que la simple onda sinusoidal. Afirman que sus modelos de pulsos pueden reproducir el pulso de velocidad presente en los registros que estudiaron, sin embargo no parecen ser adecuados para representar el contenido de altas frecuencias que normalmente vienen “montados” en los pulsos largos de velocidad. Sus estudios indican no muy buena equivalencia para rango de periodos bajos, esto para relaciones entre el periodo estructural y el periodo del pulso  $T/T_p$  menores a 0.25, mientras que existe una aceptable equivalencia dentro del rango  $0.375 < T/T_p < 3.00$ .

Los pulsos de velocidad desarrollados por Menun y Fu (2002) incorporan dos parámetros de forma  $n_1$  y  $n_2$  además de la amplitud máxima y periodo del pulso de velocidad equivalente  $A_v$  y  $T_v$  respectivamente. Casos típicos de estos pulsos se muestran en la Figura 14.

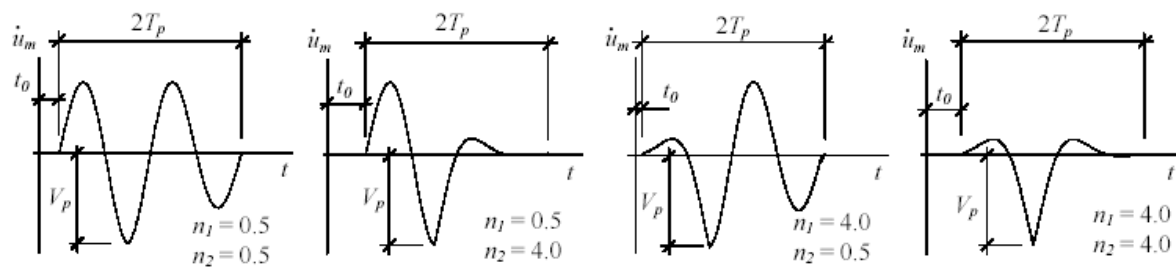


Figura 14. Pulsos de velocidad simplificados de Menun y Fu (2002).

Otros investigadores han desarrollado modelos de pulsos equivalentes, entre los más representativos se pueden citar a los pulsos de Agrawal and He (2002), Bertero et al. (1999), Cuesta and Aschheim (2001a, 2001b, 2004), Alavi and Krawinkler (2000), Makris and Chang (1998) y Menun and Fu (2002).

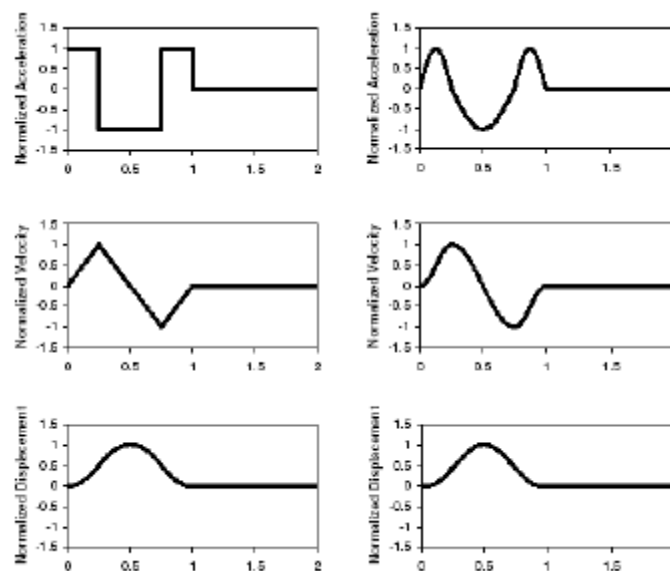


Figura 15. Modelos de pulsos simplificados. Alavi and Krawinkler, 2001 (izq.); Sasani y Bertero, (2000) (der).

La Figura 15 muestra los pulsos de aceleración, velocidad y desplazamiento correspondiente al tipo P2 propuesto por Alavi y Krawinkler (2001) compuestos de una onda cuadrada en las aceleraciones que tiene la ventaja de un mayor contenido de frecuencias altas; la parte derecha de la misma figura muestra el modelo de pulso desarrollado por Sasani y Bertero (2000) el cual parte de una onda completa tipo seno en las velocidades. En ambas figura los valores de aceleración, velocidad y desplazamiento están normalizados a sus valores máximos y el tiempo se ha normalizado al periodo del pulso  $T_p$ .

## 4. CONCLUSIONES

Del presente trabajo se extraen las siguientes conclusiones:

- 4.1. En los EEUU, la presencia de pulsos largos de aceleración en los registros sísmicos es conocida desde la década del '50 del siglo pasado. Su carácter destructivo fue motivo de discusión a partir de 1970, en tanto que luego del terremoto de Loma Prieta (1989) y Northridge (1994) fue reconocido en forma generalizada y asumida la necesidad de incluir requerimientos especiales en los reglamentos de diseño sísmico a fin de tener en cuenta las altas demandas que aparecían en las zonas cercanas a fallas.
- 4.2. En términos generales se puede decir que en Sudamérica, a pesar de que grandes conglomerados urbanos están emplazados próximos a fuentes sismogénicas, aún no se ha abordado el problema con la debida atención.
- 4.3. Se ha descrito en forma detallada el mecanismo de la directividad de la ruptura que genera los terremotos tipo pulso que son los principales causales de colapsos y grandes daños en las estructuras.
- 4.4. Se presenta un conjunto de regresiones que permite obtener pulsos artificiales de velocidad y aceleración de manera de poder incluir en los análisis, de manera sencilla y práctica una representación en el dominio del tiempo para poder contemplar el efecto de registros impulsivos.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica (CeReDeTeC) de la Facultad Regional Mendoza de la Universidad Tecnológica Nacional y al Programa de Becas de Posgrado para Docentes de la Universidad Tecnológica Nacional que permitieron la elaboración del presente trabajo.

## REFERENCIAS

1. Aagaard, B., J. F. Hall and T. Heaton (2001). Characterization for near-source ground motions with earthquake simulations. *Earthquake Spectra*, Volume 17, Nº 2, 177-207.
2. Abrahamson, N. A. (2000). Effects of rupture directivity on probabilistic seismic hazard analysis. *Sixth International Conference on Seismic Zonation: Managing Earthquake Risk in the 21<sup>st</sup> Century*, Earthquake Engineering Research Inst., Oakland, California.
3. Agrawal, A. K. and W.-L. He (2002). A closed-form approximation of near-fault ground motion pulses for flexible structures. *15th ASCE Engineering Mechanics Conference*. June 2-5, 2002, Columbia University, New York.
4. Alavi, B. and H. Krawinkler (2000). Consideration for near-fault ground motion effects in seismic design. *12th World Conference on Earthquake Engineering*, New Zealand, paper 2665.

5. Alavi, B. and H. Krawinkler (2001). Effects of near-field ground motion on building structures. *CUREE Publication N° CKIII-02*. CUREE-Kajima Joint Research Program, Phase II.
6. Anderson, J. C. and V. V. Bertero (1987). Uncertainties in Establishing Design Earthquakes. *Journal for Structural Engineering*, Vol 113, N° 8, 1709-1724.
7. Balasch, E., J. Camps, F. Crisafulli, C. Frau, D. García Gei, A. Giuliano, J. Giunta, C. Llopiz, N. Maldonado, E. Quiroga y A. Reboredo (2008). Comisión redactora del proyecto de reglamento argentino para construcciones sismorresistentes, parte I, construcciones en general, Mendoza, 2008.
8. Bertero, V. V., J. C. Anderson and M. Sasani (1999). Impulse earthquake ground motions: a historical and critical review. En J. C. Anderson, V. V. Bertero and R. Bertero. *Performance improvement of long period buildings structures subjected to severe pulse-type ground motions*. PEER 1999/09, Appendix A, 215-219.
9. Bolt, B. A. (1975). San Fernando earthquake, 1971: magnitudes, aftershocks and fault dynamics. *Chapter 21. Bulletin 196. California División of Mines and Geology. Sacramento*.
10. Bolt, B. A. (1997), Discussion of enduring lessons and opportunities lost from the San Fernando Earthquake of February 9, 1971, by Paul C. Jennings. *Earthquake Spectra*, Vol. 19, N°3, 545-547, *EERI, Oakland, CA*.
11. Bolt, B. A. (2003). *Earthquakes*. 5th Ed., W.H. Freeman, New York
12. Bolt, B. A. and N. A. Abrahamson (2003). Estimation of strong seismic ground motions. In: *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, Part B, IASPEI.
13. Bray, J. and A. Rodriguez-Marek (2004). Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24, 815-828. Elsevier Ltd.
14. Cuesta, I. and M. A. Aschheim (2001a). Isoductile strengths and strength reduction factors of elasto-plastic SDOF systems subjected to simple waveforms. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Volume 30, 1043-1059.
15. Cuesta, I. and M. A. Aschheim (2001b). Inelastic response spectra using conventional and pulse R-factors. *Journal of Structural Engineering*, September 2001, 1013-1020.
16. Cuesta, I. and M. A. Aschheim (2004). The use of simple pulses to estimate inelastic response spectra. *Journal of Earthquake Engineering*, Volume 8, N° 6, 865-893.
17. Federal Emergency Management (2001). *2000 Edition NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, Part I, Provisions*. FEMA-368, Washington, D.C.
18. Federal Emergency Management (2004). *2003 Edition NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, Part I, Provisions and Part II, Commentary*. FEMA-450, Washington, D.C.
19. Frau, C. D. y G. R. Saragoni (2005a). Respuesta no lineal de sistemas simples a terremotos de campo cercano. *I Encuentro de Investigadores y Docentes de Ingeniería (ENIDI), Universidad Tecnológica Nacional, Regional Mendoza y Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ingeniería, Mendoza, Argentina*.
20. Frau, C. D. y G. R. Saragoni (2005b). Demanda sísmica de fuente cercana. Situación del Oeste Argentino. *Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica, IX Jornadas, Concepción, Chile*.
21. Frau, C. D. y G. R. Saragoni. (2006a). Regiones cercanas a fallas activas para la zona sísmica 4 de la República Argentina. *II Encuentro de Investigadores y Docentes de Ingeniería (ENIDI), Universidad Tecnológica Nacional, Regional Mendoza y Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ingeniería, Mendoza, Argentina*.
22. Frau, C. D. y G. R. Saragoni. (2006b). Características de la respuesta sísmica a terremotos de campo cercano o tipo pulso. *XIX Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, Mar del Plata, Argentina*.

23. Frau, C. D., G. R. Saragoni, L. Torres, C. Contreras, A. Figueroa y E. Brandolín (2007). Regiones cercanas a fallas activas desde el punto de vista del diseño sísmico. *VII Encuentro de Investigadores y Profesionales Argentinos de la Construcción (EIPAC)*, Salta, Argentina.
24. Frau, C. D. y E. O. Silva (2003). Demanda sísmica de aceleración y desplazamiento de grandes terremotos. *VI Encuentro de Investigadores y Profesionales Argentinos de la Construcción (EIPAC) y XI Seminario Iberoamericano de Ingeniería Sísmica*, Mendoza, Argentina.
25. Frau, C. D., G. R. Saragoni y C. Costa (2009). Parámetros sismológicos en fallas sismogénicas de la República Argentina. *XII Congreso Geológico Chileno*. Santiago, 22-26 Noviembre, 2009.
26. Frau, Carlos Daniel (2009). “*Demanda sísmica incluyendo efectos de directividad en zonas near-fault de Argentina*”. Tesis doctoral, 371 pp, dirigida por Dr. G. Rodolfo Saragoni. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, diciembre de 2009.
27. Fukushima, Y. and T. Tanaka (1990). A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America* 80,(4), 757.
28. Gilbert, G. K. (1907a). The investigation of the California earthquake of 1906. In *Jordan, D. S. ed. The California earthquake of 1906, San Francisco*. A. M. Robertson. 215-256.
29. Gilbert, G. K. (1907b). The earthquake as a natural phenomenon. In *The San Francisco earthquake and fire of April 18, 1906, and their effects on structures and structural materials*. U. S. Geological Survey Bulletin, Vol. 324, 1-13.
30. Hernández J. M. y G. R. Saragoni (2002). Estudio de la respuesta no lineal en condiciones de colapso sísmico. *VIII Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, Valparaíso, Chile.
31. Housner, G. W. and D. E. Hudson (1958). The Port Hueneme earthquake of March 18, 1957. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 48(2), 163-168.
32. Hwang, R.-D., G.-K. Yu and J.-H. Wang (2001). Rupture directivity and source-process time of the September 20, 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake estimated from Rayleigh-wave phase velocity. *Earth Planets Space*, 53, 2001, 1171–1176.
33. Iwan, W. D. and K. Toki (1998). Mitigation of near-field earthquake damage in urban areas. *U.S.- Japan Workshop, U.S. National Science Foundation and Japan Society for the Promotion of Science. Hawaii, January 1998*.
34. Jennings, P. C. (1997). Enduring lessons and opportunities lost from the San Fernando Earthquake of February 9, 1971. *Earthquake Spectra*, Vol. 19, Nº3, 25-53, EERI, Oakland, CA.
35. Kircher & Associates Consulting Engineers (2003). *Near-source factors - History*. [Disponible en [http://peer.berkeley.edu/research/pdf/Near-Source\\_Factors\\_History-Kircher.pdf](http://peer.berkeley.edu/research/pdf/Near-Source_Factors_History-Kircher.pdf)].
36. Lay, T. and T. C. Wallace (1995). *Modern Global Seismology*. San Diego: Academic Press.
37. Li, X., Z. Zhou, M. Huang, R. Wen, H. Yu, D. Lu, Y. Zhou and J. Cui (2008). Preliminary Analysis of Strong-Motion Recordings from the Magnitude 8.0 Wenchuan, China, Earthquake of 12 May 2008. *Seismological Research Letters*, Volume 79, Nº 6, November/December 2008, 844-854.
38. Makris, N. and S.-P. Chang (1998). Effect of damping mechanisms on the response of seismically isolated structures. *PEER Report 1998/06, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Univ. California, Berkeley*, Nov. 1998.
39. Malhotra, P. K. (1999). Response of building to near-field pulse-like ground motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Volume 28, 1309-1326.
40. Menun, Ch. and Q. Fu (2002). An analytical model for near-fault ground motions and the response of SDOF systems. *Proceedings of the 7th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*.

41. Rodriguez-Marek, A. (2000). *Near-fault seismic site response*. A dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. University of California, Berkeley.
42. Rojas, K y G. R. Saragoni (2002). Fundamentos empíricos para las bases de un diseño sísmico basado en la potencia de los acelerogramas. *VIII Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Sísmica, Valparaíso, Chile, abril 2002*.
43. Rosenblueth, E. and J. Prince (1965). El temblor de San Salvador, 3 de Mayo, 1965: Ingeniería Sísmica. *Revista de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica*, 3(2), 33-60
44. Ruiz, T. S., G. R. Saragoni (2004). Características de los acelerogramas y terremotos sudamericanos. *XXXI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Mendoza, 17-21 Mayo, 2004, Argentina*.
45. Sadigh, K., C.-Y. Chang, J. A. Egan, F. Makdisi and R. R. Youngs (1997). Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data. *Seismological Research Letters, Volume 68, N° 1, January/February 1997*, 180-189.
46. Saragoni, R. (2004). Características destructivas de los acelerogramas de fuente cercana y los grandes terremotos argentinos. *XVIII Jornadas de Ingeniería Estructural, Conferencia N° 4, Buenos Aires, Argentina, octubre 2004*.
47. Saragoni, G. R. y M. V. Rojas (2000). Análisis de la potencia sísmica de acelerogramas destructivos. *XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Punta del Este, Uruguay, noviembre 2000*.
48. Sasani, M. and V. V. Bertero (2000). Importance of severe pulse-type ground motions in performance-based engineering: historical and critical review. *12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand, paper 1302*.
49. SEAOC (1996). Recommended lateral force requirements and commentary. *Blue Book 6<sup>th</sup> ed. Sacramento, California: Structural Engineers Association of California*.
50. Shakal, A., V. Graizer, M. Huang, R. Borchardt, H. Haddadi, K.-W. Lin, C. Stephens and P. Roffers (2005). Preliminary analysis of strong-motion recording from the 28 september 2004 Parkfield, California earthquake. *Seismological Research Letters, Volume 76, N° 1, January/February 2005*, 27-39.
51. Somerville, P.G. (1998). Development of an improved representation of near fault ground motions. *Proceedings SMIP98 Seminar on Utilization of Strong Motion Data*. California Strong Motion Instrumentation Program, Sacramento, CA, 1-20.
52. Somerville, P. G. (1999). Near-fault directivity pulse model: development and application in scenario and probabilistic maps of pulse parameters in the San Francisco bay area. *Award N° 99HQGR0030, URS Greiner Woodward Clyde*. [Available in <http://erp-web.er.usgs.gov/reports/annsum/vol40/sc/g0030.pdf>].
53. Somerville, P.G. (2000). Magnitude scaling of near-fault ground motion. *Proceedings Intentional Workshop on Annual Commemoration of Chi-Chi earthquake, Volume 1*, 59-70.
54. Somerville, P.G. (2001). Seismic hazard simulation and prediction. *PEER Annual Meeting, Oakland, January 25-26, 2001*.
55. Somerville, P.G. (2002). Characterizing near-fault ground motion for the design and evaluation of bridges. *Proceedings of the Third National Conference and Workshop on Bridges and Highways, Portland, Oregon, April 29 – May 1, 2002*.
56. Somerville, P.G. (2005). Engineering characterization of near-fault ground motions. *2005 New Zealand Society Earthquake Engineering Conference, New Zealand, March 2005*.
57. Somerville, P. G. and N. F. Smith (1996). Accounting for near-fault rupture directivity in the development of design ground motions. *Proceedings of the 11<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico, N° 711*.
58. Somerville, P. G., N. F. Smith, R. F. Graves and N. A. Abrahamson (1997). Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity. *Seismological Research Letters, Volume 68, N° 1*, 199-222.



59. Somerville, P.G., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith and A. Kowada (1999). Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion. *Seismological Research Letters*, Volume 70, N° 1, January/February 1999, 59-80.
60. Stewart, J., S. Chiou, J. Bray, R. Graves, P. Somerville and N. Abrahamson (2001). *Ground motion evaluation procedures for performance-based design*. PEER Report 2001/09, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, September 2001.
61. Veletsos, A. S. (1969). Maximum deformations of certain nonlinear systems. *Proceedings of the Fourth World Conference on Earthquake Engineering*. Santiago de Chile, January 13-18, 1969, Volume II, A-4, 155-170.
62. Veletsos, A. S., N. M. Newmark and C. V. Chelapati (1965). Deformation spectra for elastic and elastoplastic systems subjected to ground shock and earthquake motions. *Proceedings of the Third World Conference on Earthquake Engineering*. New Zealand, Volume II, 663-682.
63. Wang, S. Y., Y. X. Yu, A. J. Gao and X. J. Yan (2000). Development of attenuation relations for ground motion in China. *Earthquake Research in China*, 16(2), 99-106.
64. Wells, D. L. and K. J. Coppersmith (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Volume 84, N° 4, 974-1002.